

GEYSERS JEOTERMAL SAHASI, BİR ENJEKSİYON BAŞARI HİKAYESİ

M. Ali KHAN

ÖZET

Geyser jeotermal sahası, dünyanın en büyük jeotermal sahasıdır, San Fransisko, Kaliforniya'nın 100 km kuzeyinde yer alır. Saha 1960 yılında 12 MWe'lık bir ünite ile üretime başladı. 1987'de buhar üretimi 112 milyar kg, elektrik üretimi yaklaşık 1500 MWe ile zirve değerine ulaştı (kurulu kapasite 2043 MWe). Ardından hızlı bir üretim düşümü oldu. Bu noktada kümülatif reenjeksiyon kabaca %25 idi, bunun sonucu rezervuar kuruyor ve aşırı kızgın hale geliyordu. Rezervuarın daha fazla beslenememesi halinde, üretilebilir enerjinin sadece %33'ü elde edilebilirdi. Dolayısıyla, enjeksiyon yapılarak daha fazla ısı üretim işlemi başlatılabildi. Fakat, soğutma kulelerindeki kondens suyu ve mevsimsel olarak akan derelerden başkada rezervuara basacak su yoktu.

Lake County ve Santa Rosa (Sonoma County) şehirleri işlenmiş kanalizasyon atıklarını yok edecek bir yolu yıllardır arıyorlardı. Geyser sahasının suya, şehirlerin atık sularını yok etmeye ihtiyacı olduğundan, eşine ender rastlanan özel sektör ve kamu işbirliği başladı. 1997 yılında, Lake County 42 km uzunluğunda bir boru hattı yaptı ve ayda 1.01 milyon kg ikinci derece işlenmiş atık suyu, Geysers sahasına enjekte ederek daha fazla buhar üretmek için taşıdı. Bu durum Santa Rosa ve Sanoma County'deki diğer belediyelerinde benzer boru hatları yapmasını teşvik etti. 2003 yılında, Santa Rosa'nın boru hattı tamamlandı ve Geyser sahasına aylık 1.25 milyon kg daha üçüncü derece işlenmiş atık su enjekte edilmeye başlandı. Halen sahadan üretilen akışkanın yaklaşık %85'i bu boru hatları ve diğer kaynaklardan sağlanarak enjekte edilmektedir. Bu uygulama sürdürülebilir buhar üretimini sağladı, kondanse olmayan gaz üretimini düşürdü, elektrik üretiminin verimini iyileştirdi ve emisyonu azalttı. İki boru hattının elektrik üretimine katkısı yaklaşık 155 Mwe'dır. Geysers sahası dünyanın en büyük ısı üretim sahası haline geldi. Kasım 2008 verilerine göre Geysers'de 2394 milyar kg buhar üretildi, 954 milyar kg akışkan enjekte edildi, sonuçta yerine konan net akışkan miktarı %39.9 oldu. Bu başarı hikayesi yerel olarak "atıktan buhar" olarak adlandırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Geysers jeotermal sahası, enjeksiyon.

ABSTRACT

The Geysers Geothermal field, the largest in the world, is about 70 miles north of San Francisco, California, USA. The field started production in 1960. The steam production peaked at 112 billion kg, generating 1,500 MWe in 1987. A rapid decline in production ensued. At that point the cumulative mass replacement rate (i.e., the fluid re-injection rate) was only about 25%, resulting in reservoir dry-out and superheat. With the help of injection, a major heat mining operation could start. But there was no water; all the cooling tower recoveries and streams and creeks were already being re-injected into the reservoir.

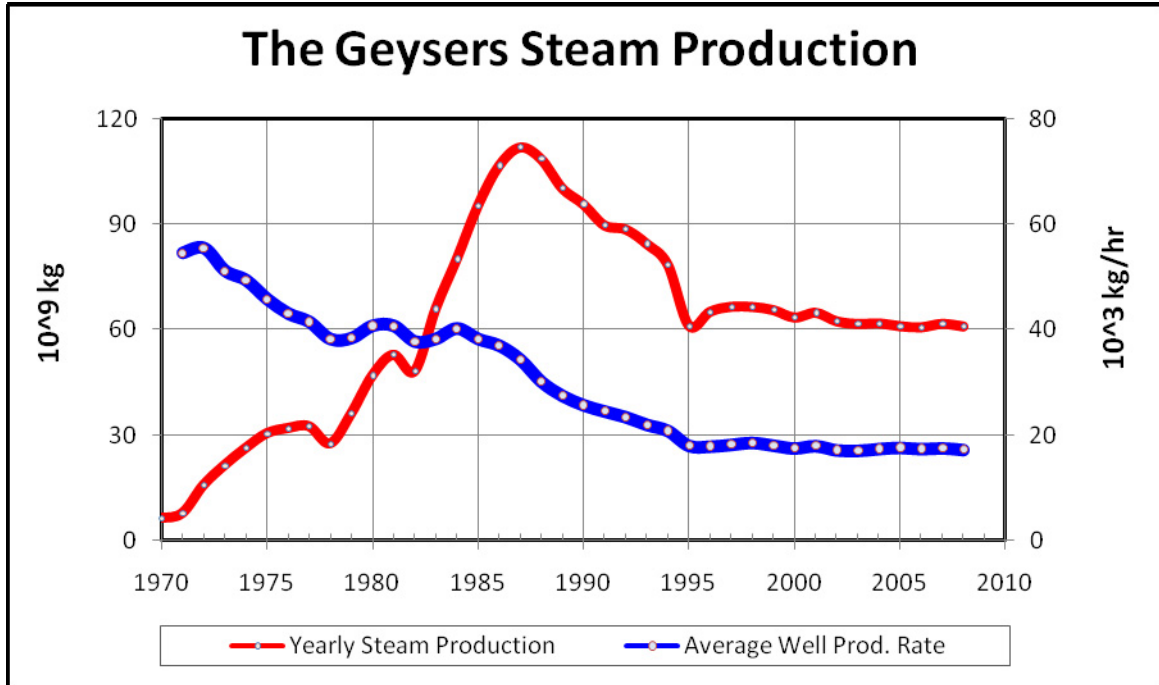
For many years, Lake County and the city of Santa Rosa (Sonoma County) had been looking for various avenues to dispose their treated effluent. Since The Geysers was in need of water and the county and city needed an effluent disposal outlet, unique public-private collaboration began. This has resulted in a sustained steam production, decrease in non-condensable gases, improved electric generation efficiency, and lower air emissions. The additional electricity generated from these two pipelines is about 135MWe. Locally this success story is called "Flush to Flash."

Key Words: Geysers geothermal field, injection.

1.GİRİŞ

Geysers sahası San Fransisko-Kaliforniya'nın 100 km kuzeyindedir, 1960 yılında 12 MWe kurulu güçle üretime başlamıştır. Alanda 1979 -1989 döneminde çok hızlı bir gelişme yakalandı. Delinen kuyu sayısı ve kurulu güç artarken, toplam üretim 1987 yılında 112 milyar kg ile zirve yaptı, oysa kuyu başına düşen maksimum üretim zirvesi 1972 yılında 55,439 kg/h idi (Şekil 1).

1960'dan 1969'a kadar enerji santrallerinin soğutma kulelerinden toplanan kondens suları Big Sulphur deresine deşarj edildi. Daha sonra Bölgesel Su Kontrol Yönetimi (RWQCB) deşarji sınırlandırdı ve bunun sonucu olarak enjeksiyon, atıklardan kurtulmak için hayati bir yöntem oldu. 1976-1980 arasında rezervuarlarda soğutma kullerinden kazanılarak tekrar reenjekte edilen miktar yaklaşık %25 idi. 1980 de, enjeksiyon felsefesi "atıktan", "ısı madenciliğine" doğru kaydı. Suyla ilgili önceki düzenlemeler Geysers'deki işletmecilerin dere ve akarsulardan, bu bölgede su alabilmesini sınırladı, fakat 1980'den 1993' e kadar bu kaynaklardan su alınmasına izin verildi ve rezervuarda yerine konulan akışkan miktarı %28'e yükseldi. Rezervuar basıncı ve buhar üretimi düşerken, yerine koyma işi daha yaşamsal hale geldi. Tüm soğutma kulesi kondensleri, elde edilebilen dere ve yüzey suları rezervuara reenjekte edildiğinden, Geysers sahasında kullanılabilir daha fazla su kalmamıştı.



Şekil 1. Geysers Sahasında Buhar Üretimi (Petrol, Gaz ve Jeotermal Kaynaklar Bölümü).

2. GÜNEYDOĞU GEYSERS ATIK BORU HATTI (SEGEP)

Geysers'de üretim ve basıncın hızla düştüğü zamanlarda, Lake County, Santa Rosa kenti ve başka bazı yerel yönetimler işlenmiş kanalizasyon sularından kurtulmanın yollarını arıyorlardı. 1990'ların başında Lake County atık sularını Geysers'e pompalamaya başladı. Çalışmalar atık suların enjekte edilmesinin aynı anda iki önemli amaca hizmet edeceğini gösterdi: ilki, buhar sahasının sürekli olarak atık sularla beslenmesinin Geysers'deki verimlilik düşüşünü azaltacağını ve ikinci olarak işlenmiş kanalizasyon atıklarının enjekte edilmesinin halen kullanılmakta olan yüzey suların enjekte edilmesinden çevresel olarak daha üstün olduğunu. Yavaş yavaş proje üzerinde kamu ve özel sektör arasında bir anlayış birliği ve ortaklık gelişti.

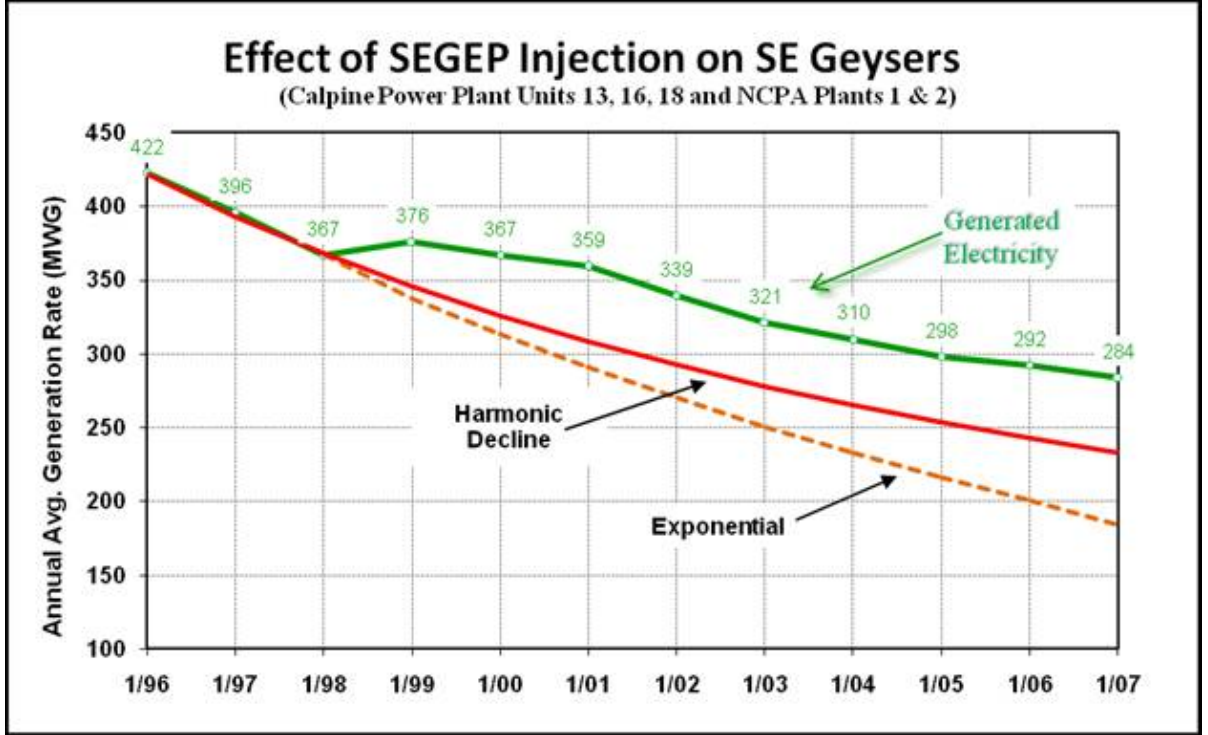
İki yıl süren inşaat çalışmalarından sonra, boru hattı 16 Ekim 1997'de resmen hizmete girdi. Toplam inşaat maliyeti 37 milyon dolar boru hattı ve 8 milyon dolar atık suyun işlenmesi olmak üzere, 45 milyon dolar olarak gerçekleşti. Boru hattı 41-51 cm çapında ve 42 km uzunluğundadır. Ayda 883,000 kg işlenmiş atık su Geysers sahasına reenjekte edilmek üzere taşınmaya başlandı. Enjeksiyon sistemindeki başarı sonucunda, 2003 yılında birçok bölge daha sisteme eklendi. Bu ilave ile birlikte hattın uzunluğu 85 km'ye ve aylık kapasitesi 1.01 milyon kg'a çıktı. Şimdi sistemde bulunan 8 adet pompa istasyonu, akışkana toplam 600 m'lik bir yükseklik kazandırarak Geysers sahasındaki enjeksiyon dağıtım istasyonuna basmaktadır. On yılda (Ağustos 1987–Ağustos 2007) Lake County boru hattı sahaya 106.6 milyon kg su sağladı ve ilave olarak 3.5 milyon MWh daha elektrik üretildi (Şekil 2).

3. SANTA ROSA – GEYSERS BESLEME HATTI (SRGRP)

1970 ve 1980'ler arasında, Santa Rosa ve çevresi büyük bir gelişme yaşadı. Bu gelişme ile birleşen atık sular üzerindeki sıkı denetim ve olağandışı iklim koşulları, atık su yönetimini çökertti. Bölgesel Su Kontrol Yönetimi (RWQCB) atık ve sızıntılar için ceza kesti ve bunların önlenmesi için emir verdi. Dahası, şehrin uzun vadeli gelişimi için, bunların önlenmesi zorunluydu. Bir çok seçenek üzerinde çalışıldıktan sonra, Santa Rosa şehri Geysers'e enjeksiyon seçeneğini hazırladı. Lake County boru hattı gibi, özel ve kamu sektörü arasında bir işbirliği geliştirildi. İnşaat 2001 yılında başladı ve 2003 Eylül'de tamamlandı. 76-122 mm çapında, 76 km uzunluğundaki boru hattı ve üç pompa istasyonu milyonlarca galon suyu 850 m yüksekteki bekleme tanklarına taşınmaktadır. Calpine pompa istasyonlarını işletmek için gereken 8 MWe sağlamaktadır. Bekletme tanklarının kuzeyinde, SRGRP tesisleri, 22 km boru hattı (20-76 mm çapında), bir pompa istasyonu ve iki tank Calpine tarafından işletilmektedir. İlave bir megavat daha enerji kullanılarak SRGRP hattından elde edilen su, sahanın daha evvel SEGEP boru hattı veya temiz su sağlanamayan bölümlerine dağıtılmaktadır.

Kasım 2003'den Ağustos 2007'ye kadar Santa Rosa ve Sanoma County çevresinden Geysers sahasına enjeksiyon için ayda 1.25 milyon kg üçüncü derece işlenmiş atık suları gönderdi. Ağustos 2007'de Santa Rosa'nın boru hattına pompaladığı su miktarını %35 artırması onaylandı. Böylece Santa Rosa, Kaliforniya eyaletinde atık sularının %95'ini yeniden değerlendiren birkaç şehirden biri haline geldi.

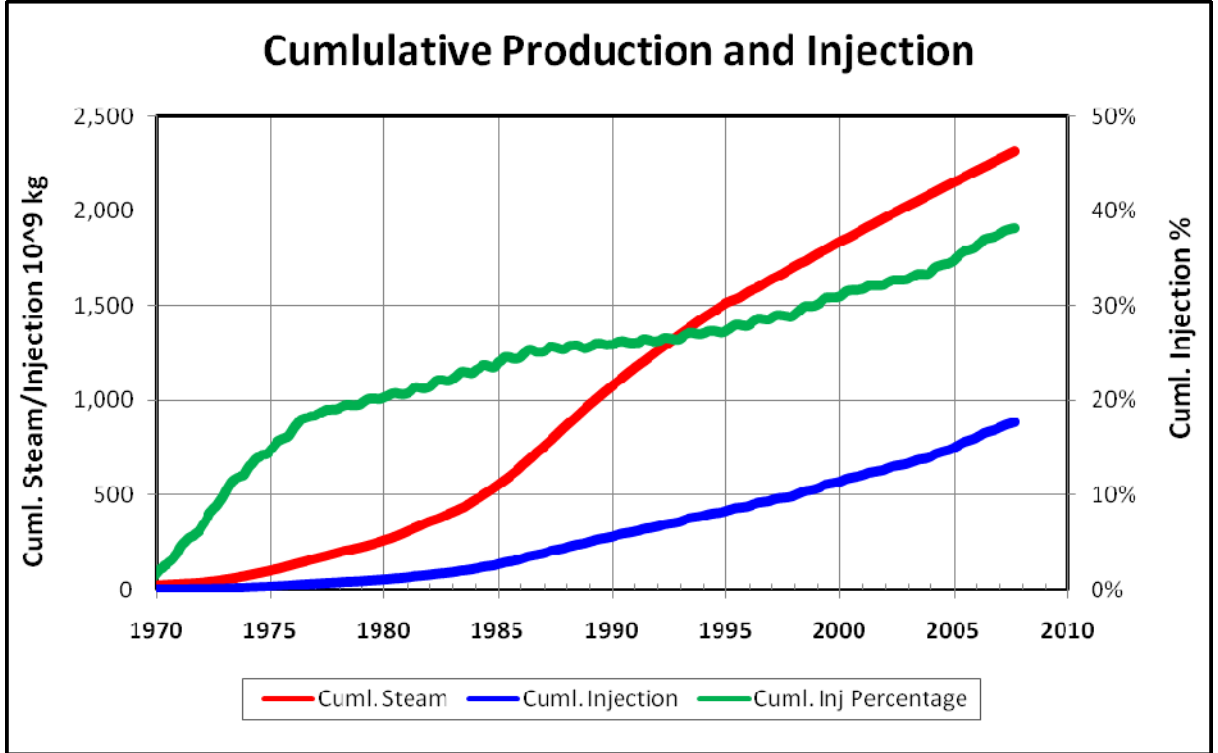
SRGRP hattının ilave 85 MWe katkı yapması beklenmektedir. Bu boru hattı ile daha fazla enerji üretiminin yanı sıra, sahanın ömrü uzatılmakta ve jeotermalin gelecekte çevreye yararlı bir şekilde enerji üretimi yapması garanti altına alınmaktadır.



Şekil 2. SEGEP Boru Hattı Enjeksiyonunun Güney Doğu Geysers'e Etkisi (Calpine Enerji santralleri 13, 16, 18 ve NCPA Üniteleri) (Calpine ve NCPA' nın izni ile)

4. ŞİMDİKİ DURUM

Şimdiki durumda her iki boru hattından rezervuara basılan su miktarı üretimin %80-%90'ı arasında yıldan yıla değişmektedir. Aylık olarak %120'ye kadar çıkabilmektedir. Sonuçta önemli miktarda ek buhar üretimi, kondense olmayan gaz miktarında azalma sağlandı, böylece elektrik üretim verimliliği arttı ve havaya daha az emisyon salındı. Geysers sahası dünyanın en büyük ısı madenciliği işletmesi yapılan yer oldu. Aralık 2008'in sonunda, Geysers'de üretim 2394 milyar kg buhara ulaştı (Şekil 3) ve enjete edilen miktar 954 milyar kg oldu. Şimdiki durumda Geysers sahasının ömrü boyunca yerine konulan net akışkan miktarı %39.9 oldu. Bundan sonraki dönemde üretimin %100'ünden daha fazla reenjeksiyon yapılırsa bile, toplam yerine konulan akışkan miktarının hiçbir zaman %100'e ulaşamayacağı tahmin edilmektedir.



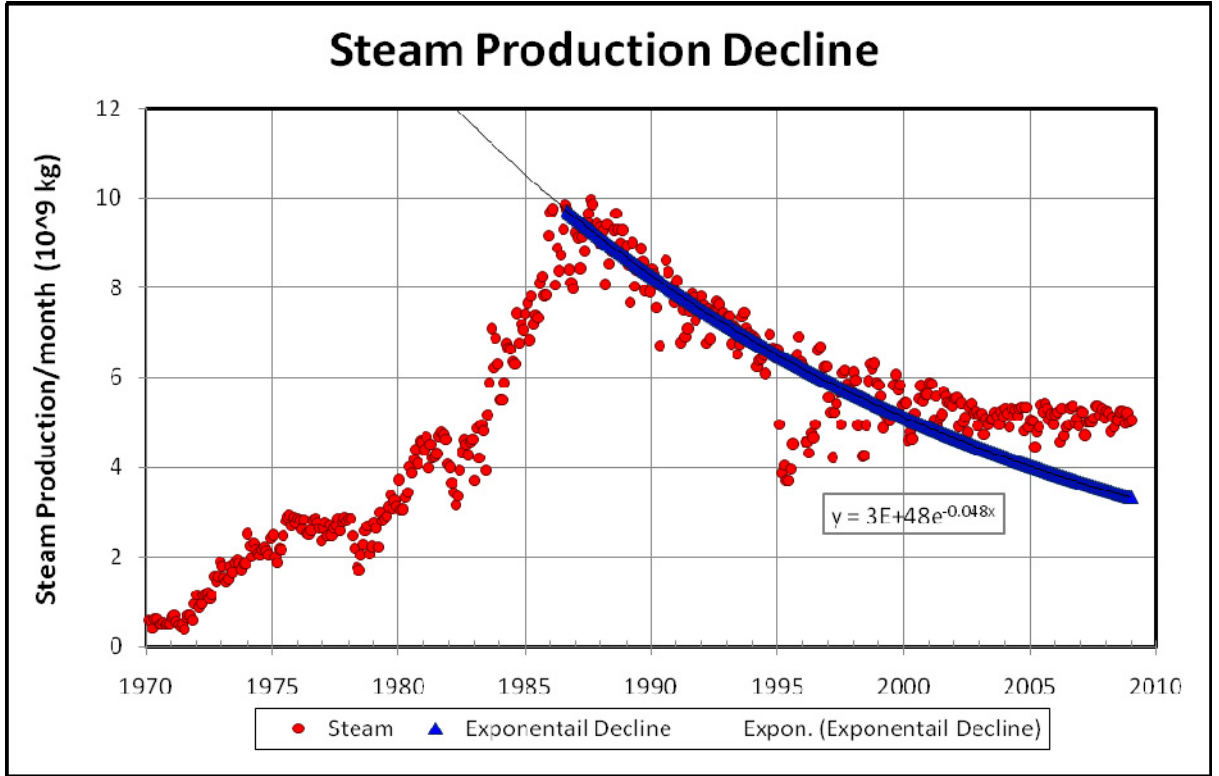
Şekil 3. Kümülatif Üretim Ve Enjeksiyon Miktarı (Petrol, Gaz ve Jeotermal Kaynaklar Bölümü).

5. BASINÇ VE BUHAR AZALIMI

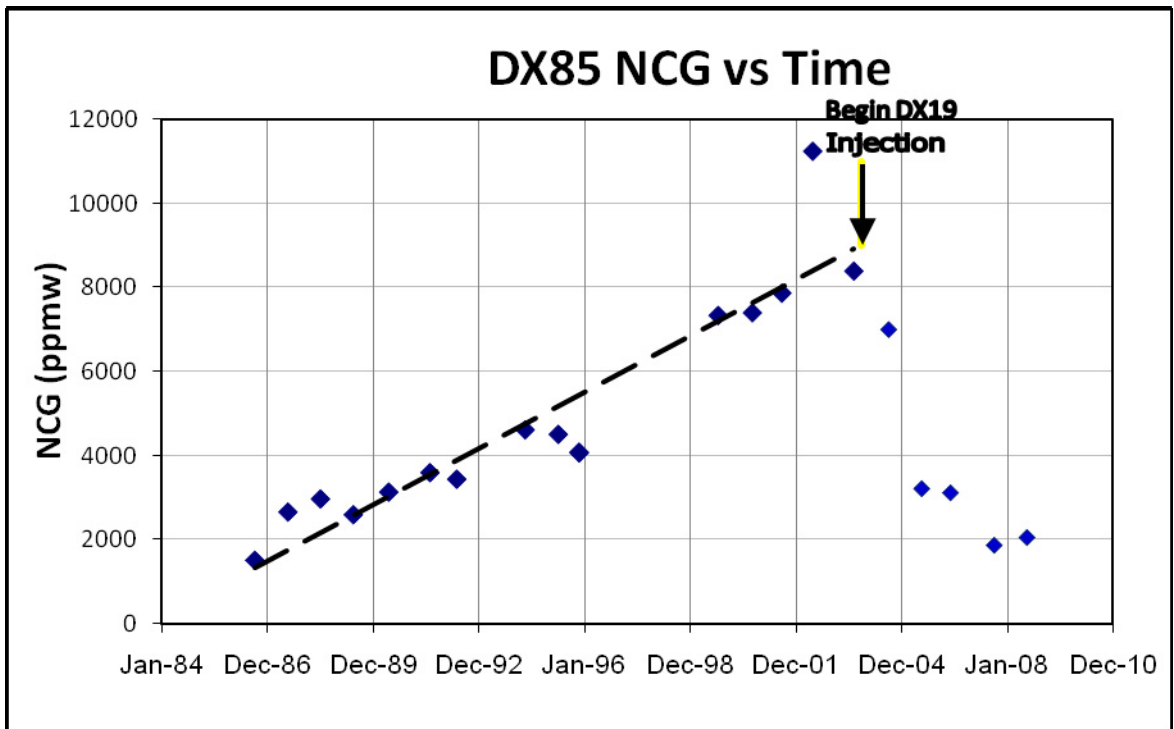
İki boru hattının katkısıyla sağlanan ilave enjeksiyon buhar üretimi ve rezervuar basıncının korunması üzerine olumlu etkiler yaptı. Şekil 4'de aylık buhar üretimi zamana karşı gösterilmiştir. Kırmızı noktalar gerçekleşen üretimi, mavi çizgi ise çakışma sağlayan exponansiyel azalma eğrisini göstermektedir. Yayınlanan datalar kullanılarak bazı tahmini değerler ve yaklaşık azalma eğrileri yapılabilir. Herhangi bir azalım eğrisi yönteminde olduğu gibi, beklenen sonuçlar yalnız bireysel yorum temelinde değil rezervuar parametrelerinin değişmesi halinde de değişir. Bu metodun kullanılmasıyla, yıllık buhar üretimindeki azalma hızı enjeksiyon hattından önceki değer olan %4.8'den, %1'in altına düşmektedir.

6. YOĞUŞMAYAN GAZLAR (NCG)

Daha önce belirtildiği üzere, Geysers sahasına yapılan ek enjeksiyon rezervuar buhar basıncını destekledi, böylece basınç düşüm hızı azaldı. Geysers'e yapılan ek enjeksiyonun bir başka faydası da üretilen buhar içindeki yoğuşmayan gazların (NCG) azalması oldu. Saha çapındaki NCG konsantrasyonu buharın azalması ve kondens suyunun enjete edilmesiyle artmıştır. Enjekte edilen ve çok az miktarda NCG içeren işlenmiş sular, rezervuardaki NCG konsantrasyonunu azaltmaktadır. Sonuçta üretilen buhardaki NCG seviyesi azaldıkça, emisyon miktarı azalmakta ve türbindeki elektrik üretim verimi artmaktadır. Örneğin 1986-2003 yılları arasında DX85 kuyusundaki NCG miktarı 5 kat arttı (Şekil 5). 2003 yılında DX19'a reenjeksiyonun başlamasıyla DX85 kuyusundaki NCG oranı azalmaya başladı, 1990'dan beri görülmeyen bir seviyenin altına gireledi.



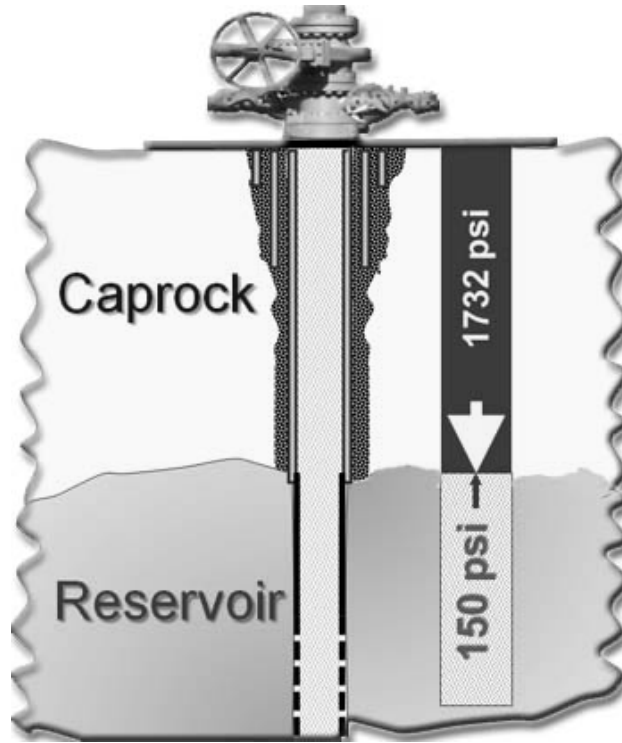
Şekil 4. Buhar Üretimi ve Azalma Eğrisi.



Şekil 5. DX85 Kuyusu NCG Konsantrasyonunun Zamanla Değişimi. [2]

7. ENJEKSİYON YÖNTEMİ

Sahadaki tipik bir kuyu Şekil 6'da görülmektedir. Üretim koruma borusu örtü kayacın temeline kadar indirilir ve çimentolanır (4000 ft, yaklaşık 1200 m). Kaliforniya'da tüm jeotermal kuyularda koruma borularının yüzeye kadar çimentolanması zorunludur. Örtü kayacın tabanından rezervuarın alt sınırına derinlik yaklaşık (9000 ft, yaklaşık 2770 m) dir, enjekte edilen suların rezervuarın hedeflenen bölümlerine ulaştırılıp-dağıtılması için filitreli borular üretim borusuna asılır. Şimdiki rezervuar basıncı 150 psi civarındadır, başlangıçta 500 psi idi. 4000 ft'de enjeksiyon sütununun net basıncı 1532 psi'dir (1732 – 150 psi). Bu basınç farkı ve binlerce milidarcy'yi bulan yüksek permeabiliteden dolayı, büyük miktarda akışkan gravite ile rezervuarı beslemektedir. Şu sıralar sahada çoğu üretim kuyusundan dönüştürülmüş 75 tane reenjeksiyon kuyusu bulunmaktadır. İki tane yatay reenjeksiyon kuyusu Geysers'de delindi. Bu kuyuların amacı enjekte edilen suları daha geniş alana yaymaktır ve böylece enjeksiyondan kaynaklanan sismik hareketlerin azaltılması amaçlanmaktadır. Sonuçlar cesaret verici görünmekle beraber, kesin bir kaniya ulaşmak için henüz çok erkendir.



Şekil 6. Tipik Bir Enjeksiyon Kuyusu Şaması.

8. ETKİ İLE OLUŞAN (İNDÜKLENEN) DEPREMSELLİK

Geysers sahasında, üretim ve enjeksiyonun etkisiyle oluşan sismisite merak edilmektedir. Geysers'de Amerikan Jeolojik Araştırmalar Kurumu (USGS) Ulusal Lawrence Berkley Laboratuvarı (LBNL) ve Calpine'in tarafından işletilmekte olan üç dizi sismik gözlem istasyonu bulunmaktadır. İki tane güçlü hareket dedektörü Geysers sahasının güney ucuna yerleştirilmiştir. Bu istasyonların verileri USGS'in internet sayfasından indirilebilir ve anlık görülebilir. Birçok gaz ve petrol işletmesinde, yaratılan sismisite üretim ve önemli derecede basınç azalması ile ilgilidir. Ancak, Geysers sahasındaki sismisitenin büyük bir kısmı rezervuara enjekte edilen akışkanın rezervuar kayacı hızla soğutmasından kaynaklanan gerilimle ilişkilidir. Sismik olarak Geysers sahası oldukça aktiftir ve yıllık şiddeti 1.5'den büyük binlerce sismik hareket olmaktadır. Çok azı hissedilecek kadar büyüktür, en büyüğü 4.5 şiddetindedir. Mikro depremlerin sayısı SEGEP ve SRGRP boru hatları ile enjeksiyon yapılmasıyla daha da artmıştır. Şiddeti ($M \geq 3$) depremlerin sayısı hemen hemen aynı kalmıştır.

SONUÇ

47 yıllık üretim ve enjeksiyon faaliyetleri ile, 460 üretim ve 75 enjeksiyon kuyusu kullanılarak Geysers sahasından Kaliforniya'nın yenilenebilir elektrik enerjisinin %25'i elde edilmektedir. Enjekte edilen sularının üçte ikisi, iki boru hattı ile taşınan işlenmiş atık sulardır. Bunun sonucunda 155 MWe fazladan enerji üretilmekte, sahanın ömrü uzatılmakta ve yerel yönetimler için daha iyi atık su yönetimi seçeneği sağlanmaktadır. Mikro sismisite enjeksiyonla birlikte artmış olmakla beraber, şiddetli sismisitenin enjeksiyonla bir ilişkisi yoktur.

TEŞEKKÜR

Birçok meslektaş bu projeye yardımcı oldu. Özellikle, Calpine'dan K. Goyal, A. Pingol Melinda; NCPA'dan Steve Eneyd and Bill Smith ve DOGGR'den E. Johnson, ve L. Tabilio'ya teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] BEALL, J.J., M.C. ADAMS, and J.L. SMITH, "Geysers Reservoir Dry Out and Partial Restoration Evidenced by Twenty-Five Years of Tracer Tests." Geothermal Resources Council Transaction, v. 25, 2001.
- [2] BEALL, J.J., M.C. WRIGHT, and J.B. HULEN, "Pre- and Post-Development Influences on Fieldwide Geysers NCG Concentrations", Geothermal Resources Council Transaction, v. 31, 2007.
- [3] GOYAL, K.P., and A.S. PINGOL, "Geysers Performance Update Through 2006", Geothermal Resources Council Transaction, v. 31, 2007.
- [4] KHAN, M. A., "A New Computer Program for Geothermal Decline Curve Analyses." Geothermal Resources Council Transaction, v. 22, 1998.
- [5] KHAN, M. A., ESTABROOK R., "New Data Reduction Tools and their Application to The Geysers Geothermal Field", Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 2005.
- [6] SANYAL, S.K., "Forty Years of Production History at The Geysers Geothermal Field, California—the Lessons Learned." Geothermal Resources Council Transaction, v. 24 ,2000.
- [7] STARK, M. A., et al., "Santa Rosa—Geysers Recharge Project, Geysers Geothermal Field, California, USA." Proceedings of the World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

M. Ali KHAN

M. Ali Khan Kaliforniya eyaleti, Petrol, Gaz ve Jeotermal Kaynaklar Bölümü, Çevre Koruma Birimi'nde görevlidir. Jeotermal sondaj, üretim ve enjeksiyon işlemlerini denetler, teknik verileri dağıtır ve kamu sağlığı ve güvenliği ile ilgili toplantıları destekler. Khan maden mühendisliğinde lisans ve yüksek lisans, jeoloji mühendisliğinde yüksek lisans derecelerini Ortadoğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ)'den aldı. 30 yıldır ABD, Pakistan, Almanya ve Türkiye'de petrol, gaz ve jeotermal sektöründe çalışmaktadır. Kariyerinin başlangıcında, Elektrik İşleri Etüt İdaresi, Ankara'da çalıştı. Master derecesinden sonra, Wintershall AG'de Pakistan'da deniz sondajlarında ve Almaya Barnstorf'da çalıştı. Daha sonra Gulf Coast firmasının Amerika operasyonlar müdürü oldu. Son 16 yıldır kuzey Kaliforniya'daki Geysers sahasında çalışmaktadır. M. Ali Khan Amerikan Petrol Jeologları Derneği, Gulf Coast bölümü "En iyi Makale" ve "Petrol ve Gaz Aramada Yeni Fikirler" "Leverson" ödülü ile Kaliforniya Çevre Koruma Bölümü "Üstün Başarı Ödülü" sahibidir.

THE GEYSERS GEOTHERMAL FIELD, AN INJECTION SUCCESS STORY

M. Ali KHAN

ABSTRACT

The Geysers Geothermal field, the largest geothermal field in the world, is about 100 km north of San Francisco, California. The field started production in 1960 with a 12 MWe power plant. By 1987, steam production peaked at 112 billion kg, generating approximately 1,500 MWe (installed capacity =2,043 MWe). A rapid decline in production ensued. At that point the cumulative mass replacement rate (i.e., the fluid re-injection rate) was only about 25%, resulting in reservoir dry-out and superheat. Without additional recharge, only about 33% of the recoverable heat-energy could be extracted. Hence, with injection, a major heat mining operation could start. However, there was no water except for the cooling tower recoveries and seasonal streams.

For many years, Lake County and the City of Santa Rosa (Sonoma County) had been looking for avenues to dispose their treated effluent. Since The Geysers was in need of water and the county and city needed an effluent disposal outlet, a unique public-private collaboration began. In 1997, Lake County constructed a 42 km long pipeline to transport 1.01 million kg of secondary treated effluent per month to The Geysers for injection, which resulted in additional steam. This prompted Santa Rosa and other municipalities in Sonoma County to construct a similar pipeline. By the end of 2003, the Santa Rosa pipeline was completed, resulting in an additional 1.25 million kg of tertiary treated effluent to The Geysers every month. The current mass replacement from both pipelines and other sources is about 85% of production. This has resulted in sustained steam production, a decrease in non-condensable gases, improved electric generation efficiency, and lower air emissions. The additional electricity generated as a result of these two pipelines is about 155 MWe per year. The Geysers has become the largest heat mining operation in the world. By December 2008, The Geysers had produced 2,394 billion kg of steam, and injected 954 billion kg of fluids, resulting in a net mass replacement of 39.9%. Locally this success story is called "Flush to Flash." ↴

Keywords: Geysers geothermal field, injection.

1. INTRODUCTION

The Geysers Geothermal field, which is located about 100 km north of San Francisco, California, started production in 1960 with a 12 MWe power plant. The field development picked up at a rapid pace from 1979 through 1989. Despite the drilling of new wells and an increase in installed capacity, the total steam production peaked at 112 billion kg in 1987, whereas the average steam production per well peaked in 1972 at 55,439 kg/well/hr (Figure 1).

From 1960 through 1969, the condensate collected from the power plant cooling towers was discharged into Big Sulphur Creek. Thereafter discharge limits set by the Regional Water Quality Control Board (RWQCB) resulted in injection being the most viable disposal method. From 1976 through 1980 the mass replacement rate (i.e., the fluid re-injection rate) was about 25%, which is approximately the cooling tower recovery at The Geysers. By 1980, the philosophy of injection started shifting from "disposal" to "heat mining." Prior-established water rights limit the ability of the operators at The Geysers to extract water from the streams and creeks in this region, but from 1980 through

1993 the amount of fresh water extraction that was allowed was able to increase the mass replacement rate to about 28%. As the steam production and reservoir pressures continued to decline, the need to increase mass replacement became increasingly more acute. However, there was no more water available at The Geysers; all the cooling tower recoveries and the waters available from the streams, surface water sources were already being re-injected into the reservoir.

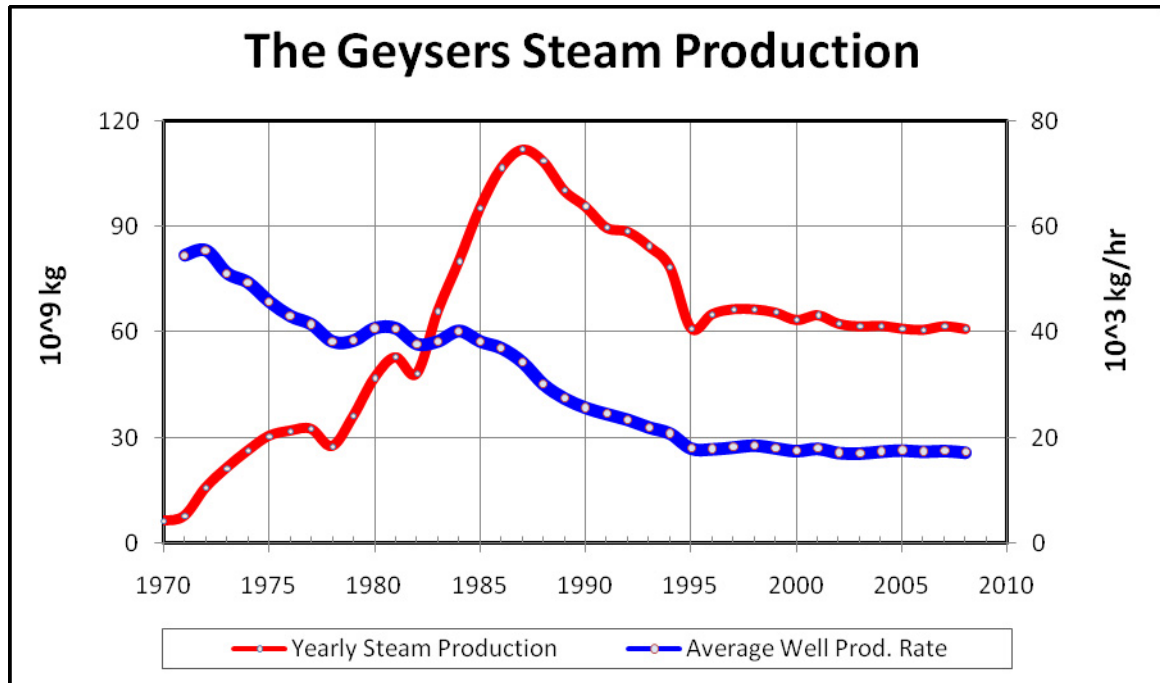


Figure 1. Steam Production (Division of Oil, Gas, and Geothermal Resources).

2. SOUTHEAST GEYSERS EFFLUENT PIPELINE (SEGEP)

At the time The Geysers steam production and reservoir pressures were declining rapidly, the communities of Lake County, City of Santa Rosa, and other municipalities were trying to find solutions for the disposal of their treated sewage waters. From the early 1990s, Lake County started looking into piping its treated waters into The Geysers. Studies showed that injecting wastewater could achieve two critical objectives at same time: first, as a continuous supply of steamfield recharge water that could help mitigate The Geysers productivity decline; and second, as an effluent disposal method that would be environmentally superior to conventional surface water discharge methods currently in use. Slowly they built consensus on the project and a partnership was developed between public and private sectors.

After two years of construction, the pipeline was formally dedicated on October 16, 1997. The total construction cost was \$45 million, including \$37 million for the pipeline and \$8 million in wastewater system improvements. The 41-to-51-cm diameter pipeline is 42 km long. It started transporting about 883,000 kg of secondary treated effluent per month to The Geysers for injection. The injection project success resulted in a second phase, completed in 2003, which added more sanitation districts. With this extension, the system currently uses eight pump stations to move approximately 1.01 million kg of treated effluent through 85 km of pipeline with a total elevation gain of 600 meters to the injection delivery station in The Geysers. In ten years (August 1997 - August 2007) the Lake County pipeline has brought in 106.6 billion kg of water, generating about 3.5 million MWh additional electricity (Figure 2).

3. SANTA ROSA RECHARGE GEYSERS PIPELINE (SRGRP)

During the 1970s and 1980s, Santa Rosa and its neighboring communities experienced rapid growth. This growth, combined with increasingly stringent regulations on wastewater and unusual weather conditions, made its wastewater system vulnerable to failure. Responding to some spills and planned discharges, the RWQCB fined the City and issued a cease-and-desist order. In addition, it required the City to develop a long-term project that would prevent such releases in the future. After studying many possible solutions, in 1997, the City of Santa Rosa prepared and adopted The Geysers injection alternative. Like the Lake County pipeline, a partnership was developed between public and private sectors. Construction began in 2001 and was complete by September 2003. The 65 km pipeline, 76-to-122-cm in diameter, and three pump stations lift the water 850 m from the valley floor near Healdsburg to the million gallon termination tank. Calpine provides the 8 MWe of electrical power needed to operate the pumps. SRGRP facilities north of the termination tank are owned and operated by Calpine and include 22 km of pipelines (diameter 20-to-76 cm), one pump station, and two tanks. Using an additional one megawatt of power, SRGRP water is distributed around the field, primarily to areas not previously supplied with fresh or SEGEP water.

From November 2003 to August 2007, SRGRP has been delivering 1.25 million kg per month of tertiary treated effluent from Santa Rosa and other municipalities in Sonoma County to The Geysers for injection. In August 2007, the City of Santa Rosa approved an increase in the amount of wastewater pumped to The Geysers by 35%. This will make Santa Rosa one of the few cities in California that recycle 95% of its wastewater.

The SRGRP injection is expected to generate an additional 85 MWe. By extending the life of the steamfield, the SRGRP will help assure that the environmental benefits of geothermal power generation will continue into the future.

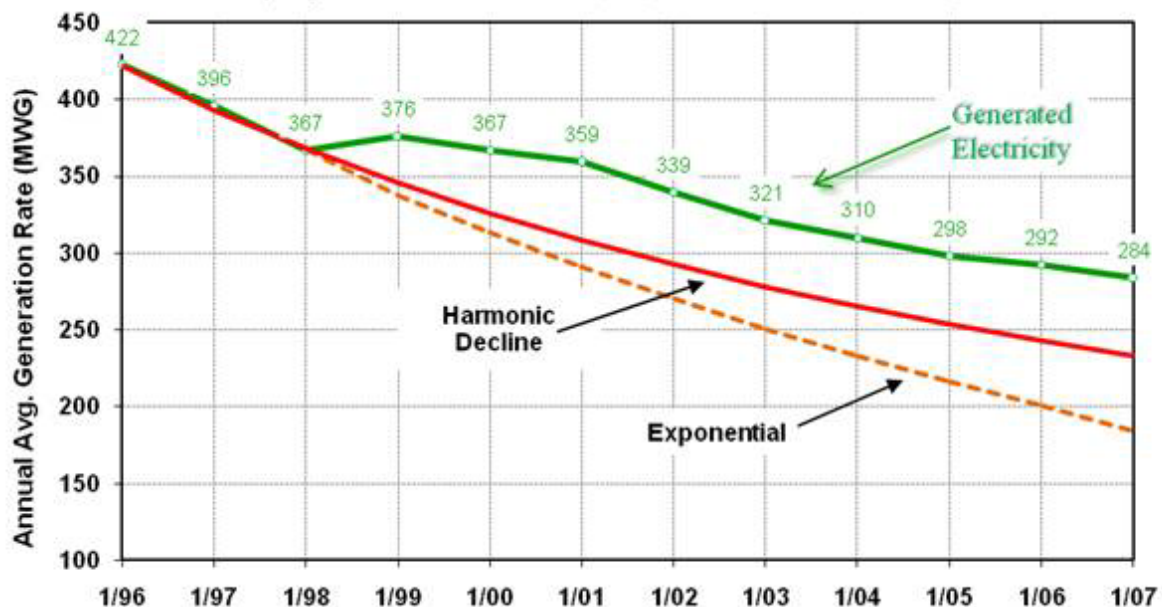


Figure 2. Effect of SEGEP Injection on SE Geysers. (Calpine Power Plant Units 13,16,18 and NCPA Plant 1&2). (Courtesy of Calpine and NCPA).

4. CURRENT STATUS

The current mass replacement from both pipelines and other sources varies from year to year between 80% and 90% of production, whereas on a monthly basis the mass replacement can be as high as 120%. This has resulted in significant additional steam production, decreases in the

concentration of non-condensable gases in the steam being produced, improved electric generation efficiency, and lower air emissions. The Geysers has become the largest heat mining operation in the world. By the end of December 2008, The Geysers had produced 2,394 billion kg of steam (Figure 3), and injected 954 billion kg of fluids, currently resulting in a lifetime net mass replacement of 39.9%. Even with the anticipated increases in future annual mass replacement rates, that are expected to be more than 100% of production, the cumulative mass replacement will seemingly never be able to approach 100%.

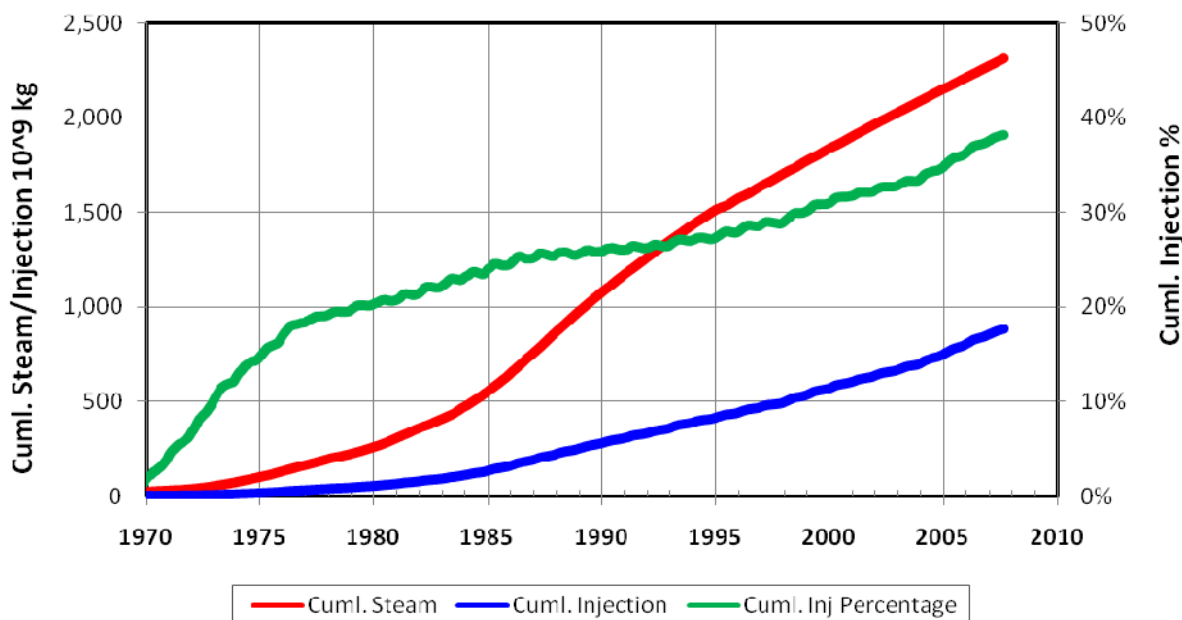


Figure 3. Cumulative production and injection (Division of Oil, Gas, and Geothermal Resources).

5. PRESSURE AND STEAM DECLINE

The combined additional mass replacement as a result of the two pipelines has had a positive effect on steam production and reservoir pressure maintenance. In Figure 4, monthly steam production is plotted against time. The red line denotes the actual production, the blue line is the exponential decline curve-fit. An attempt is made to provide some ballpark values using published data and some approximate decline curve estimations. As is the case with any decline curve method, the expected results may change, not only due to individual interpretation, but also if the reservoir parameters are changed. By using this method, the annual steam production decline rate decreased from 4.8% per year before the pipeline injection to less than 1%.

6. NON CONDENSABLE GASES (NCG)

As noted, supplemental injection in The Geysers supports reservoir steam pressure, thus decreasing the rate of production decline. An additional benefit of supplemented Geysers injection has been the decrease of Non Condensable Gases (NCG) in produced-steam. Field-wide NCG concentrations have been increasing with the depletion of the steam and with the re-injection of produced-steam condensate. The injection of treated effluent, which contains very little dissolved NCG, is resulting in the formation of low NCG injection-derived steam that dilutes the NCG concentrations in the reservoir. Lower levels of NCG in produced-steam results in lower air emissions and more efficient steam-to-electric generation. For example, between 1986 and 2003, NCG concentrations in well DX85 increased by over a factor of five (Figure 5). Injection into DX19, which began in late 2003, has reduced DX85 NCG to a level not seen since 1990 [2].

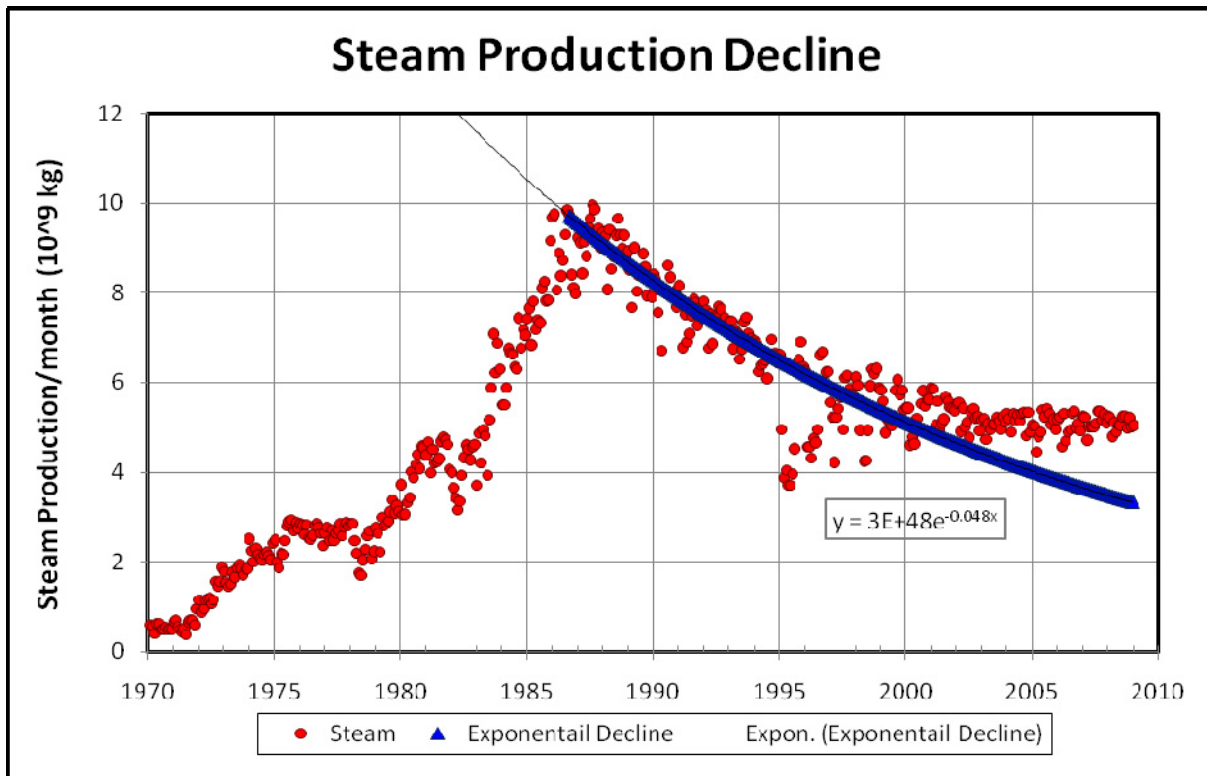


Figure 4. Steam production and decline curve-fit.

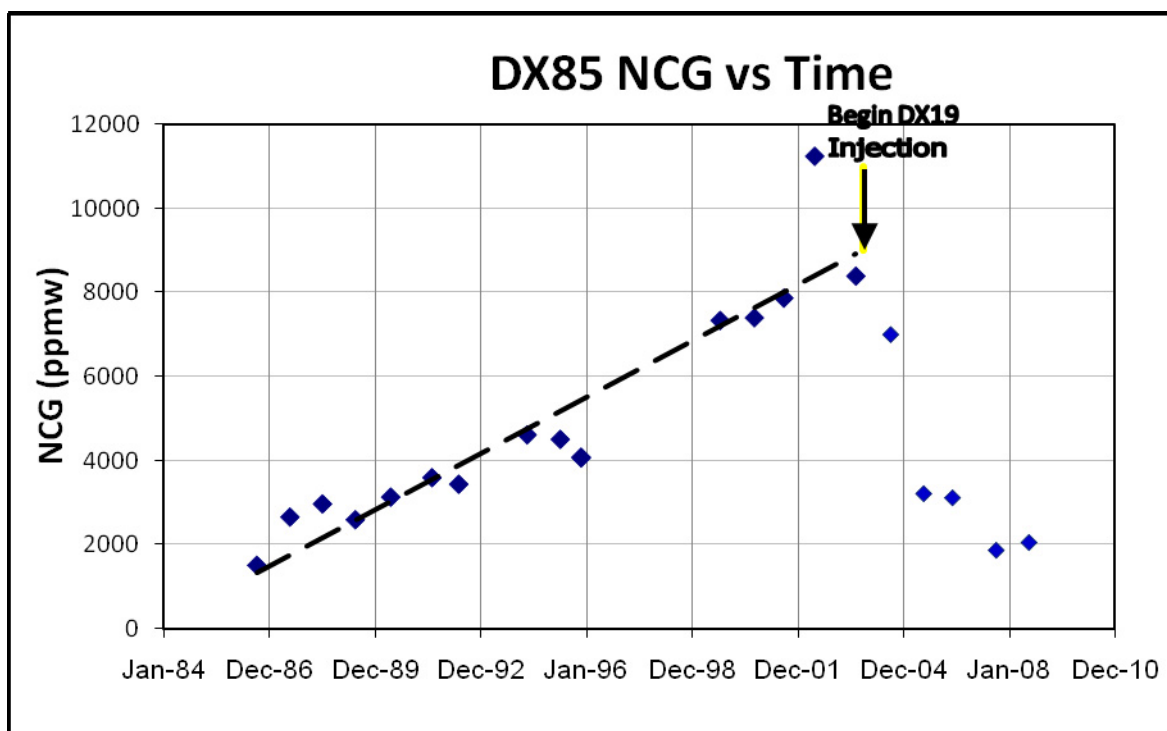


Figure 5. DX85 NCG concentration versus time [2].

7. INJECTION METHODS

A typical well (Figure 6) will have a cemented casing string up to the base of the cap rock, at approximately 4,000 feet. All casings in geothermal wells in California are required to be continuously cemented from the casing shoe to the surface. From the base of the cap rock to the total depth of approximately 9,000 feet, a slotted liner may be hung to deliver the injection fluids to targeted parts of the reservoir. The initial reservoir pressure was 500 psi, while the current reservoir pressure is about 150 psi. At 4,000 feet, net hydrostatic pressure of the injection column will be about 1582 psi (1732-150). With this kind of pressure differential and very high fracture permeabilities, (hundreds of milli darcies) large amounts of injection fluids can be easily gravity fed into the reservoir. Currently, there are 75 injection wells in The Geysers, most of them converted from production wells. Two nearly horizontal injection wells have been drilled in The Geysers. The horizontal wells were intended to spread injection fluids over a wider areal extent, and thereby reduce the injection induced micro-seismicity. At this time, the result seems to be encouraging, but it maybe too early to make a definite conclusion.

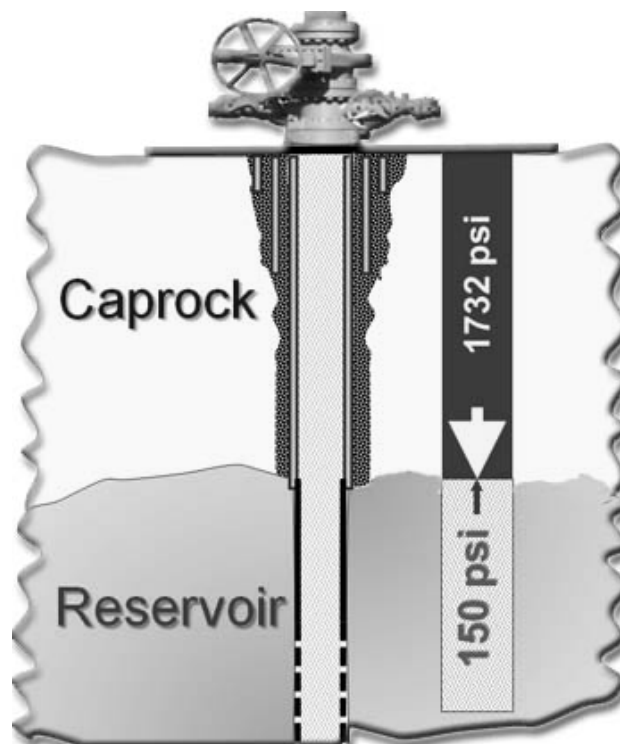


Figure 6. A typical injection well schematic.

8. INDUCED SEISMICITY

With the geothermal production and injection activity at The Geysers, induced seismicity became a concern. The Geysers field is continuously monitored by three seismic arrays operated by the United States Geological Survey (USGS), Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), and Calpine. Two strong motion detectors have also been installed in the southeastern part of The Geysers. These data may be downloaded, almost in real time, from the USGS website. In most oil and gas operations, the induced seismicity is related to the production and stress related to the significant pressure drawdown. However, at The Geysers the induced seismicity, for the most part, is related to injection, which results in the stresses produced by rock being rapidly cooled. Seismically, The Geysers is very active and about one thousand seismic events of magnitude 1.5 and greater are recorded annually. Only a few of these are large enough to be felt, with the largest magnitude being 4.5. The number of MEQs has increased with the additional SEGEP and SRGRP injection. However, the numbers of the larger earthquakes ($M > 3.0$) seem to be about the same from year to year.

CONCLUSION

The Geysers in 47 years of production and injection, with 460 production and 75 injection wells, is providing 25% of all California's renewable electrical energy. The treated effluent injection from the two pipelines amounts to about two-thirds of the total injection. This results in about 155 MWe of additional electricity, extending the life of the field and providing a better alternate for disposing the local communities' wastewater. Micro-seismicity is increasing with the increased injection, but, larger seismic events seem to be unrelated to injection.

ACKNOWLEDGMENTS

Many colleagues helped with this project in one form or another. In particular we would like to thank, K. Goyal, A. Pingol Melinda Wright of Calpine; Steve Eney and Bill Smith of NCPA, E. Johnson, and L. Tabilio of DOGGR.

REFERENCES

- [1] BEALL, J.J., M.C. ADAMS, and J.L. SMITH, "Geysers Reservoir Dry Out and Partial Restoration Evidenced by Twenty-Five Years of Tracer Tests." Geothermal Resources Council Transaction, v. 25, 2001.
- [2] BEALL, J.J., M.C. WRIGHT, and J.B. HULEN, "Pre- and Post-Development Influences on Fieldwide Geysers NCG Concentrations", Geothermal Resources Council Transaction, v. 31, 2007.
- [3] GOYAL, K.P., and A.S. PINGOL, "Geysers Performance Update Through 2006", Geothermal Resources Council Transaction, v. 31, 2007.
- [4] KHAN, M. A., "A New Computer Program for Geothermal Decline Curve Analyses." Geothermal Resources Council Transaction, v. 22, 1998.
- [5] KHAN, M. A., ESTABROOK R., "New Data Reduction Tools and their Application to The Geysers Geothermal Field", Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 2005.
- [6] SANYAL, S.K., "Forty Years of Production History at The Geysers Geothermal Field, California—the Lessons Learned." Geothermal Resources Council Transaction, v. 24 ,2000.
- [7] STARK, M. A., et al., "Santa Rosa—Geysers Recharge Project, Geysers Geothermal Field, California, USA." Proceedings of the World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005.

BIOGRAPHY

M. Ali Khan

Email: akhan@conservation.ca.gov

M. Ali Khan is a Geothermal District Engineer for the State of California, Department of Conservation, Division of Oil, Gas, and Geothermal Resources. In this capacity, he oversees geothermal drilling, production and injection operations and promotes public health and safety through public meetings and dissemination of technical data. Khan earned his Bachelor of Science (BS) degree in Mining Geological Engineering and his Master of Science (MS) degree in Geological Engineering from Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Turkey. For 30 years Khan has worked in upstream oil, gas, and geothermal projects in Turkey, Pakistan, Germany, and the United States. Early in his career, Khan worked for the Elektrik Isleri Etüt Idaresi, Ankara. Following his MS, he worked for four years with Wintershall AG as an exploration geologist in Pakistan (offshore) and Barnstorf, Germany. He then became the Director of Operations for the Gulf Coast Conoco Inc in the US. For the last 16 years he has been working with The Geysers Geothermal Field in northern California. Khan received the American Association of Petroleum Geologists' Gulf Coast Section's "Best Paper" and "Levorson" awards for "New Ideas in Exploration of Oil and Gas," as well as the California Department of Conservation's "Superior Accomplishment Award."